

DESEMPEÑO DE UN MICROSIMULADOR DE LLUVIA PORTÁTIL PARA ESTUDIOS HIDROLÓGICOS

Juan F. Weber, Héctor I. Paoli, Laureana Apestegui

Laboratorio de Hidráulica, Departamento de Ingeniería Civil, Facultad Regional Córdoba,
Universidad Tecnológica Nacional.

Maestro M. López esq. Cruz Roja Argentina. Ciudad Universitaria-CP(X5016ZAA). Córdoba – Argentina.
e-mail: jweber@civil.frc.utn.edu.ar

RESUMEN

En este trabajo se presenta un microsimulador de lluvia portátil íntegramente diseñado, construido y calibrado en el Laboratorio de Hidráulica (UTN Facultad Regional Córdoba). Este equipo, que es completamente desarmable y define una parcela de ensayo de 1 m², tiene como finalidad la medición in situ de diversos parámetros hidrológicos. El conjunto de formadores de gotas, construido con 289 agujas hipodérmicas (diámetro 0.8 mm), se alimenta de una batea con carga variable (entre 10 y 20 cm), que permite intensidades entre los 65 y 120 mm/h, la altura de caída es de 1.85 m y su diámetro medio de 5.2 mm. Si bien se contaba con una estimación inicial de la relación buscada, fue necesario una calibración sobre el prototipo para tener en cuenta las condiciones reales de operación. Las mediciones fueron realizadas utilizando 5 pluviómetros distribuidos en la parcela de estudio, con 10 observaciones por carga, para un total de 7 cargas, lo que totalizó un universo de 350 datos experimentales. Luego de un cuidadoso análisis estadístico, fue posible ajustar una curva potencial entre carga e intensidad, con una incertidumbre de ± 3 mm/h, aproximándose en un 86% los valores teóricos esperados. Los primeros ensayos de campo realizados muestran resultados satisfactorios, en comparación con la técnica del infiltrómetro de doble anillo utilizada hasta el presente en este Laboratorio.

Palabras clave: infiltración, mediciones hidrológicas, simuladores de lluvia.

ABSTRACT

This work presents a portable rainfall micro-simulator entirely designed, constructed and calibrated in the Hydraulics Laboratory (UTN Facultad Regional Córdoba). This apparatus is completely disassembled and defines a test plot of 1 m². It aims at the in situ measurement of various hydrological parameters. All the drop-formers, built with 289 needles (diameter 0.8 mm), feeding on a tray with variable hydraulic head h (10 to 20 cm), which allows intensities i between 65 and 120 mm/h. Fall height of drops is 1.85 m, and its average diameter of 5.2 mm. Although there were initial estimates of the i - h relationship, a calibration was needed on the prototype to reflect actual operating conditions. Measurements were made using 5 raingauges distributed in the test plot, with 10 observations per hydraulic head, for a total of 7 heads, which amounted 350 experimental data. After careful statistical analysis it was possible to fit a potential curve between head and intensity, with an uncertainty of ± 3 mm/hour, about 86% to the theoretical values expected. First in-situ experimental observations were successful, compared with double-ring infiltrometer technique widely used in this Laboratory.

Keywords: infiltration, hydrologic measurements, rainfall simulators.

INTRODUCCION

Uno de los procesos hidrológicos de importancia en la modelación de eventos hidrológicos es la infiltración. La determinación in situ de los parámetros de un modelo de infiltración, se puede realizar a través de dos tipos de mediciones: las globales, que plantean un balance a nivel de cuenca, lo cual exige disponer de instrumental espacialmente distribuido en la misma y las puntuales, en las cuales se estiman parámetros en sitios específicos. Entre estas últimas se cuentan los ensayos del infiltrómetro de doble anillo y los microsimuladores de lluvia.

En el ámbito del Laboratorio de Hidráulica, Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Córdoba (UTN-FRC), se han llevado a cabo numerosas mediciones a través del dispositivo conocido como infiltrómetro de doble anillo (Weber et al., 2005).

Este ensayo tiene la ventaja de ser de fácil implementación, pero presenta tres limitaciones importantes, a saber: i) el ensayo es de carácter puntual, esto es, el área involucrada es muy pequeña y por lo tanto los errores en la extrapolación a superficies del orden de magnitud de una cuenca son muy importantes; ii) el ensayo está limitado a la condición de encharcamiento superficial permanente, lo cual limita la aplicabilidad de los parámetros a calibrar y iii) el dispositivo no representa fielmente la entrada hidrológica del sistema, esto es, la precipitación, dado que lo que se hace es mantener una lámina de agua constante en la superficie del suelo.

El microsimulador de lluvia tiene la ventaja de reproducir con más fidelidad el fenómeno de la precipitación. Numerosos autores (Marelli, 1989) muestran la importancia del impacto de las gotas en la microcapa superior del suelo en el balance hídrico, además del efecto evidente sobre la erosión superficial.

Por otra parte, en este tipo de dispositivos es posible simular una precipitación de intensidad variable en el tiempo, incluso una precipitación discontinua. La necesidad de reproducir bajo condiciones controladas los efectos de la precipitación, y en especial el impacto de las gotas de lluvia sobre las propiedades físicas del suelo superficial, y las consecuencias que ello provoca en la infiltración, escorrentía y erosión, condujeron desde hace años al desarrollo de diferentes mecanismos e instrumentos

que tratan de simular la lluvia natural (Pla Sentis, 1981; Rostagno y Garayzar, 1995). El mayor de estos problemas recae sobre la reproducción de gotas que se asemejen a las de una lluvia natural.

Los simuladores de lluvia son instrumentos de investigación diseñados para aplicar agua de forma similar a los episodios tormentosos naturales. Son útiles para obtener datos de erosión, infiltración, escorrentía superficial y transporte de sedimentos. No obstante, las características de la lluvia natural deben ser simuladas de forma adecuada, los datos obtenidos deben ser analizados cuidadosamente y se debe efectuar una buena interpretación de los resultados para obtener información fiable en las condiciones para las que ha sido aplicable la lluvia (Benito et al., 2001).

En este trabajo se presentan las características del microsimulador de lluvia desarrollado en el ámbito del Laboratorio de Hidráulica, UTN-FRC, en el marco de un Proyecto de Investigación y Desarrollo. Est equipo servirá para la determinación in situ de parámetros hidrológicos tales como infiltración, intercepción vegetal, producción de sedimentos, etc.

EL SIMULADOR DE LLUVIA

Se describe a continuación el proceso seguido en el diseño y construcción del equipo bajo análisis. Para mayor detalle, se puede consultar la referencia (Weber et al., 2009).

Antecedentes locales

Uno de los antecedentes que más se consideró a la hora de diseñar el simulador de lluvia fue el precedente local de un instrumento diseñado por Irurtia y Mon (1994); a partir de un modelo de Kamphorst (1987).

Este microsimulador de lluvia fue luego modificado por Aoki y Sereno (1999) y se encuentra actualmente en uso en la Facultad de Agronomía de la Universidad Nacional de Córdoba. En su forma básica el microsimulador es un prisma cuadrado de 1.5 m de altura y de 0.25 m de base. La estructura es de hierro en ángulo, que sostiene las paredes de acrílico transparente que actúan como rompeviento. El peso total del aparato es de 8 kg. En la parte superior se apoya sobre una caja porta gotero de acrílico, en cuya base se encuentran 49 tubos plásticos formadores de gotas. Esta caja tiene una

alimentación de agua, proveniente de un reservorio colocado en una de las aristas de la estructura. El reservorio está graduado en milímetros de lámina de agua aplicados en la microparcela, para simplificar la lectura durante la medición.

Formadores de gotas

El formador utilizado se compone de una aguja hipodérmica introducida en tubo rígido, el cual se obtiene de cortar su propio estuche, al ras de dicha aguja (Figura 1). Los formadores ensayados correspondieron a un mismo diámetro de la aguja, 0.8 mm y tres longitudes diferentes: 25.4 mm, 38.1 mm, 50.8 mm, las que corresponden a 1, 1 ½ y 2 pulgadas respectivamente.

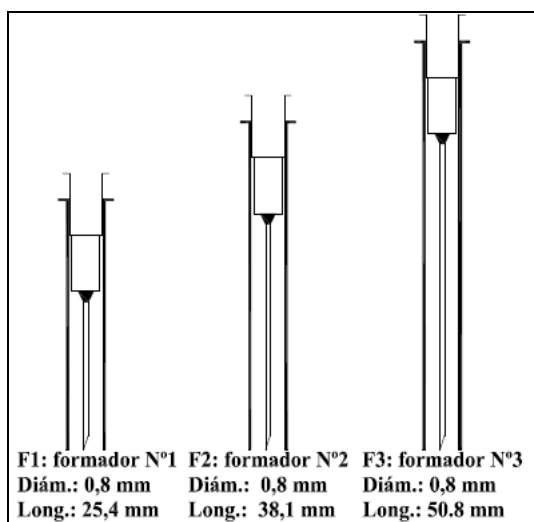


Figura 1. Formadores de gotas analizados.

Se realizó una serie de mediciones de laboratorio para determinar el comportamiento hidráulico de estos formadores (Paoli y Rojas, 2006). En base a esta información se decidió colocar un total de 289 formadores, distribuidos en 17 filas por 17 columnas y separados a una distancia de 5.30 cm entre ejes, cubriendo de esta manera cada formador un área aproximada de 28.10 cm² sobre la base de una batea de 96 cm x 96 cm de lado. El tipo de formador seleccionado fue el N° 3, correspondiente a la aguja de 2 pulgadas, ya que fue el que presentó las menores intensidades (Figura 2).

Esta elección se basó en que las intensidades logradas con los formadores más cortos y con un número de 289 formadores alcanzaron, para el formador N° 1, $i = 167$ mm/h y para el formador N° 2, $i = 149$ mm/h, valores que se consideraron

excesivos en relación a los objetivos para los cuales fue diseñado el simulador.

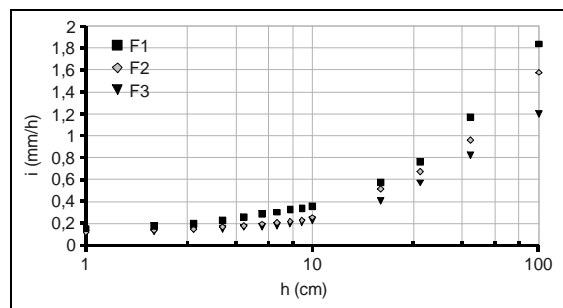


Figura 2. Intensidad de lluvia por formador – resultados experimentales.

El simulador de lluvia

El equipo (Figuras 3 y 4) consta básicamente de una estructura metálica, de caño de acero de sección cuadrada, formando un prisma cuadrado de 2 m de altura y 1 m de lado. Este prisma se forma a través de cuatro columnas y cerrado por medio de cortinas rompevientos. Las columnas sostienen el sistema de alimentación de agua que está compuesto por dos tanques, uno de alimentación solamente y el otro de alimentación y regulación de intensidad.

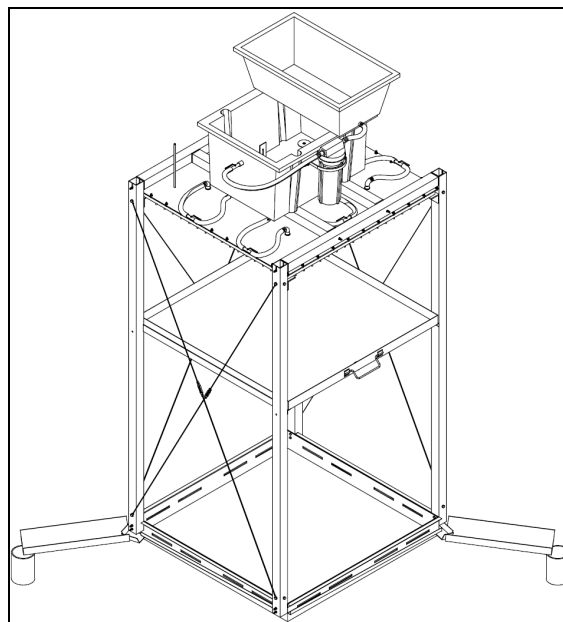


Figura 3. Simulador de lluvia – vista axonométrica.

La regulación de la intensidad se produce a través de un flotante (Achutegui et al., 1996). Debajo del sistema de alimentación de agua se encuentra la

batea con los 289 formadores de gota, que producen la lluvia simulada. La base de este prisma esta constituida por un marco cuadrado de hierro, de 1 m de lado y 0.10 m de altura, con vertederos en sus cuatro lados y canales para el transporte del agua escurrida. Este marco de hierro, en su posición de trabajo es clavado en el suelo, constituyendo así las paredes límites de la parcela de medición (Figura 4). El peso total del equipo armado es de 110.60 Kg, el peso del fluido puede llegar hasta los 100 Kg.

Las partes componentes del microsimulador de lluvia son:

- la estructura metálica: constituida por columnas, vigas tipo 1 (rigidización estructural) y tipo 2 (soporte para los tanques de alimentación), conjunto tensor y mamparas rompeviento. Las partes metálicas se hallan unidas entre sí por bulones y tuercas permitiendo así el rápido montaje y desmontaje de la estructura.

- el sistema de alimentación: conformado por los tanques alimentador 1 (reserva) y alimentador 2 (generación de carga), filtro de agua y conjunto flotante.



Figura 4. Simulador de lluvia en campaña.

- el sistema de lluvia simulada: consta de la batea con los 289 formadores de gota, los cuales pueden ser reemplazados inmediatamente ante cualquier desperfecto en campaña.

- el sistema de puesta en régimen: conformado por una bandeja intermedia, cuya finalidad es evitar que durante el periodo de puesta en régimen del sistema (del orden de 15 minutos) se altere el contenido de humedad inicial del suelo (Figura 5).

- la parcela de medición y sistema de recolección del escurrimiento superficial: la parcela de medición queda definida por el marco de hierro hincado (Figura 6), que posee salidas laterales por donde fluye el escurrimiento superficial, que es capturado por canales y conducido finalmente a los vasos de medición.

Montaje y desmontaje del equipo

Una vez finalizada la construcción del simulador, se realizó una experiencia de campo (denominada Ensayo 0) con el objeto de poner a punto el armado, operación y desarmado del equipo. En este Ensayo 0 se detectaron algunas deficiencias en el equipo que fueron subsanadas y además se midieron los tiempos de armado, puesta en régimen y desarmado, como así también el consumo de agua, valores de fundamental importancia para la planificación de futuras mediciones en campaña.



Figura 5. Puesta en régimen del simulador de lluvia.

Se indican a continuación en forma sucinta los pasos necesarios para el montaje y desmontaje del simulador de lluvia:

Montaje:

- Preparación del Terreno
- Instalación de la parcela de medición y nivelación de la misma (Figura 6).
- Sellado de los bordes de la parcela de medición
- Colocación de columnas
- Instalación de batea con formadores de gota (Figura 7).
- Colocación de vigas tipo N°1 y tipo N°2
- Ajuste de bulones y fijación de la estructura
- Colocación de ángulos guías y de bandeja intermedia
- Instalación de tanques alimentadores N°1 y N°2
- Conexión de mangueras y accesorios
- Conexión del filtro de agua (Figura 8).
- Colocación de los canales de transporte de agua
- Colocación de los puntos de medición
- Colocación de mamparas rompevientos y tensores (Figura 4).

Desmontaje:

- Desconexión de mangueras y sacado del filtro
- Remoción de tensores, mamparas rompevientos, y ángulos guías
- Desajuste parcial de los bulones de la estructura
- Retiro de vigas tipo N°1 y tipo N°2
- Retiro de la batea con formadores de gotas
- Retiro de columnas
- Extracción de la parcela de medición



Figura 6. Parcela de medición instalada en campaña.



Figura 7. Estructura armada, con batea y bandeja instaladas.



Figura 8. Tanques de alimentación y filtro de agua.

Funcionamiento

Una vez montado el equipo en el terreno se está en condiciones de comenzar el ensayo, lo cual se realizará en los siguientes pasos.

Tareas Preliminares

- Llenado de tanques: en primer lugar, se debe llenar con agua el tanque alimentador N°1, habiendo controlado antes que todas las válvulas de conexión se encuentren cerradas.
- Posicionamiento del flotante: se tendrá en cuenta con qué intensidad de lluvia se quiere realizar el ensayo y luego se posicionará la regla graduada con la que cuenta el conjunto flotante.
- Apertura de válvula de conexión entre tanques alimentadores: se abre la válvula que conecta los tanques alimentadores y se espera a que el flotante cierre el paso de agua. Con esto, se asegura un volumen de agua suficiente como para abrir las válvulas de conexión entre tanque alimentador N°2 y batea, lo que facilitará la purga completa del sistema. Cabe destacar que durante este proceso se irá recargando el tanque alimentador N°1.
- Apertura de válvulas entre tanque alimentador N°2 y batea: se comienza con la apertura de las válvulas que conectan estas dos partes componentes del simulador de lluvia.
- Regulación de la carga: mientras la batea se va cargando de agua se controla el piezómetro de ésta, el cual se encuentra graduado con una escala en centímetros. Cuando se llegue a la carga elegida se regula el paso de agua a través del conjunto flotante, con la regla deslizante dispuesta para tal fin, hasta obtener que la misma no sufra variaciones importantes.
- Verificación de funcionamiento de los formadores de gota: antes de extraer la bandeja y dar por comenzado el ensayo se debe verificar que todos los goteros se encuentren funcionando correctamente, siendo los problemas típicos las obstrucciones debido a burbujas y la formación de gotas de pequeño tamaño.
- Extracción de bandeja intermedia: por último, si la carga en el piezómetro se mantuvo constante durante 10 o 15 minutos y si se han verificado y corregido todos los formadores de gotas, ya se puede proceder a retirar la bandeja intermedia.

Tareas de Medición

Será necesario contar con por lo menos dos probetas graduadas en cada punto de medición. En la planilla correspondiente se escribirán las sucesivas hora inicial y final que tarda en llenarse un volumen fijo seleccionado para los vasos graduados. Acumulando los volúmenes en ambos vasos se obtiene el escurrimiento superficial acumulado, por diferenciación con respecto al tiempo se obtiene la tasa de escurrimiento superficial, por diferencia con la intensidad simulada, finalmente, la tasa de infiltración.

TAREAS DE CALIBRACIÓN

La calibración del simulador de lluvia tuvo los siguientes objetivos principales (Paoli, 2009):

- Verificar que la intensidad de lluvia sea homogénea en toda el área precipitada.
- Estudiar el comportamiento general del equipo.
- Determinar una curva de intensidad de lluvia para cada altura de carga sobre los formadores de gotas, junto a un intervalo de incerteza y su probabilidad de ocurrencia.
- Determinar la escala de apreciación del instrumento.
- Comparar las intensidades de lluvia reales obtenidas con el simulador de lluvia, con las estimadas para los 289 goteros que componen el equipo.

Materiales

Para determinar la homogeneidad e intensidad media de lluvia se utilizaron cinco probetas graduadas de 1000 ml, con divisiones de 10 ml cada una. En su parte superior se añadió un embudo de 32 cm de diámetro exterior y 31 cm de diámetro interior (Figura 9).

Este conjunto probeta-embudo, al que de ahora en más se denominará pluviómetro, justifica sus características en la capacidad de captar un número

representativo de gotas, con un área pequeña para la medición del volumen de agua precipitada, reduciendo de ese modo el error de apreciación en los volúmenes.

Procedimiento de ensayo

Los cinco pluviómetros se ubicaron dispuestos como lo indica la Figura 10, uno en cada esquina y el último en el centro, para lograr cubrir la mayor parte del área precipitada. Esta posición teórica se replanteó en laboratorio por medio de una plomada. Los pluviómetros recibieron las denominaciones AB, BC, CD, DA y el último de éstos correspondiente a la posición central fue llamado CENTRO.

Se midió el tiempo que tardó en llenarse un volumen fijo de 850 ml en cada pluviómetro para las diferentes cargas sobre formadores estudiadas. Estas fueron 11 cm, 13 cm, 15 cm, 17.5 cm, 20 cm, 22.5 cm y 25 cm.



Figura 9. Pluviómetro utilizado para la calibración.

Cada uno de los puntos fue medido simultáneamente durante un funcionamiento continuo del simulador de lluvia de aproximadamente 2 hs por ensayo (Figura 11), obteniéndose de esta manera diez datos por pluviómetro y una muestra total de cincuenta

datos para cada carga analizada. Esto representa un total de 350 datos obtenidos.

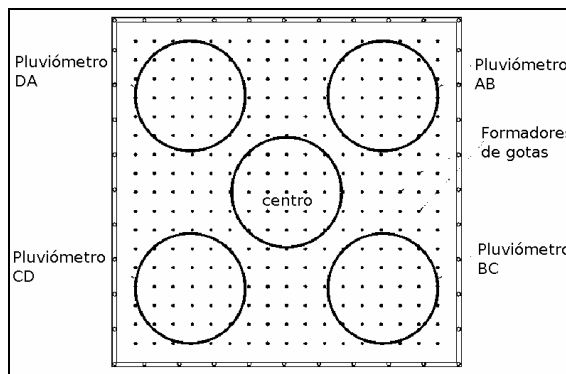


Figura 10. Distribución de pluviómetros

Es importante destacar que durante los ensayos también se filmó la variación de la presión dentro de la batea con formadores de gotas. Para ello, se utilizó una cámara digital que registró la variación de nivel en el piezómetro.

Análisis preliminar de la información

Con el volumen fijo en las probetas ($V = 850$ ml), el diámetro del embudo ($D = 31$ cm) y el tiempo de llenado, se calculó la intensidad de la precipitación:

$$i = \frac{V}{At} \quad (1)$$

siendo A el área de la boca del embudo. Se analizó la estacionariedad de la intensidad generada para carga constante, obteniéndose gráficas como la de la Figura 12 (en el ejemplo para $h = 25$ cm), graficando la intensidad de lluvia registrada en función del tiempo acumulado de ensayo. Se puede apreciar que en el pluviómetro BC se obtuvieron intensidades levemente superiores a las medidas en los restantes, presentándose este comportamiento para todas las cargas excepto la de 13 cm en donde las intensidades son similares para todos los pluviómetros y la de 15 cm en donde el pluviómetro AB produjo intensidades menores al resto.

Por otro lado, se graficaron los histogramas de intensidades obtenidas para cada carga, obteniéndose representaciones como la Figura 13 (nuevamente como ejemplo, para $h = 25$ cm). Puede observarse un sesgo importante que impide asumir una distribución de probabilidades normal. Este

comportamiento se repitió para todas las cargas, con coeficientes de asimetría entre -0.68 y 0.81.

Si bien en principio podría suponerse que el pluviómetro BC está produciendo resultados anómalos y por tanto no debería considerarse parte de una muestra homogénea de datos, se puede demostrar estadísticamente que la eliminación sin más de los datos recogidos en el pluviómetro BC no puede corregir la dispersión producida por el ingreso de alguna porción de formador (por más o por menos) en el área de captación de los pluviómetros cuando se consideran la totalidad de los datos. En efecto, se realizó una comparación entre los datos obtenidos para cada carga considerando el pluviómetro BC y prescindiendo del mismo. Se utilizó la prueba t de Student aplicada a dos muestras independientes. De esta forma fue posible comprobar si existen o no diferencias entre ambos tratamientos de datos.

La hipótesis nula (H_0), se formuló tomando a la media como parámetro de comparación para ambos casos considerados. Así, si el p-valor obtenido es menor a 0.05 se concluye que existen diferencias entre los datos con el pluviómetro BC y sin tener en cuenta los valores del mismo.

En primer lugar se obtuvieron los p-valor para cada carga en particular y se encontraron diferencias solamente en los casos correspondientes a las cargas 25 cm y 22.5 cm (Tabla 1).

Tabla 1. Resultados prueba t de Student.

carga (cm)	p-valor
25.0	0.0251
22.5	0.0376
20.0	0.0559
17.5	0.1338
15.0	0.7107
13.0	0.3375
11.0	0.1742

Luego tomando la totalidad de los datos (350) y comparándolos con los 280 finales (después de la eliminación de los datos de BC) se obtuvo un p-valor igual a 0.5024, con lo que se podría inferir que ambos tratamientos pueden considerarse equivalentes ya que no es estadísticamente discernible la diferencia.



Figura 11. Simulador de lluvia durante la calibración.

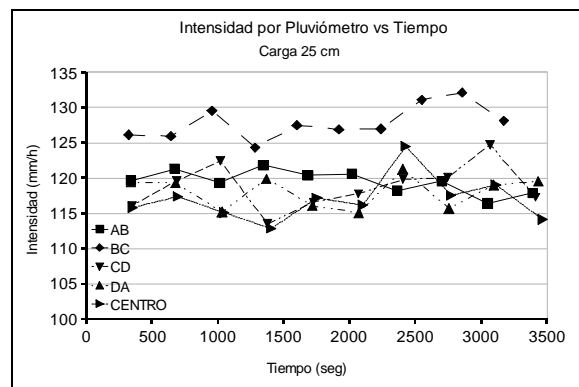


Figura 12. Intensidad en los pluviómetros – h = 25 cm.

Incluso, se adimensionalizaron los valores de cada serie en función de su media, generando de ese modo una única serie adimensional de 350 valores, para la cual también el histograma generado presentó una asimetría de 0.21 (Figura 14).

A partir de estos resultados se pudo establecer un intervalo de incerteza (alrededor de los valores medios) del orden de ± 9 mm/h. Surgió entonces la necesidad de conocer qué fracción de esta incerteza fue debida al error asociado al propio simulador y cuál debida al procedimiento de medición utilizado.

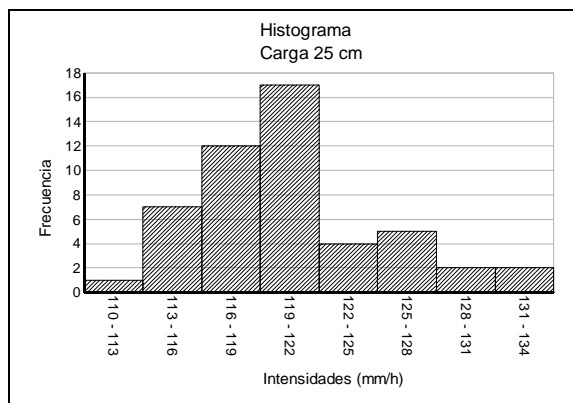


Figura 13. Histograma de intensidades – h = 25 cm.

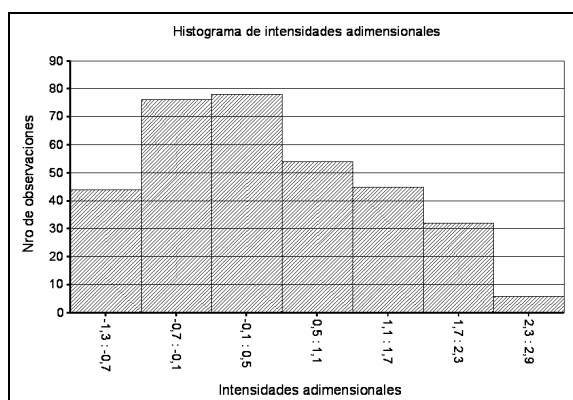


Figura 14. Histograma de intensidades adimensionales.

Análisis final de la información

Pudo detectarse que un error en el posicionamiento de los pluviómetros (Figura 10) de ± 5 mm provoca una variación en el número de formadores de gota captados entre 23 y 25 (Paoli, 2009). A partir de las intensidades teóricas sobre un formador (Figura 2) se obtuvieron diferencias de intensidad entre 7 mm/h (para $h = 11$ cm) y 13 mm/h (para $h = 25$ cm) de considerar 23 a 25 formadores. Si se analizan los rangos de intensidades medidas para las mismas cargas, de 8.3 mm/h y 19.2 mm/h respectivamente, puede detectarse la correlación representada en la Figura 15. En éstas puede observarse que el punto correspondiente a una carga $h = 25$ cm es un valor anómalo en la serie ya que cae fuera del intervalo de incerteza asumido en ± 3 mm/h (graficado con líneas de trazos en la Figura 15).

Este intervalo de incertidumbre puede justificarse además, considerando una variación hipotética de la carga en la batea de ± 5 mm (compatible con las observaciones realizadas a través de filmaciones

del nivel en el piezómetro), las cuales provocan (a partir de la aplicación de la relación teórica de la Figura 2) los valores y rangos de intensidad indicados en la Tabla 2, los que caen por debajo de ± 3 mm/h. Estas oscilaciones tendrían como principal causa el sistema de alimentación discontinuo a través de flotante.

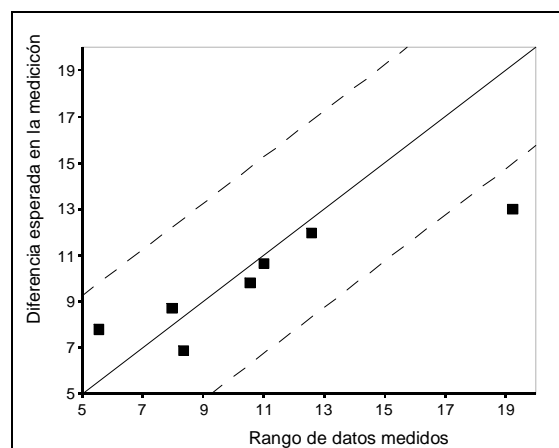


Figura 15. Errores de posicionamiento y rangos observados.

En base a lo anterior, se asumió que el intervalo ± 3 mm/h es un rango adecuado de incerteza y por tanto los errores que cayeron por fuera de él deben ser asociados a los errores propios de los instrumentos y procedimientos de calibración utilizados y no al propio simulador. Por tanto, se procedió a eliminar de la serie aquellos valores atípicos fuera del intervalo de incerteza indicado, reduciendo de este modo el conjunto de 350 a 323 datos. Se considera que dicha reducción no es significativa y que aún se conserva una cantidad suficiente de información experimental que respalda el ajuste de una curva de calibración.

Tabla 2. Variación en intensidad (mm/h) debida a oscilaciones de carga.

h (mm)	Variación de carga	
	- 5 mm	+ 5 mm
11.0	-2.54	2.53
13.0	-2.50	2.49
15.0	-2.46	2.45
17.5	-2.40	2.39
20.0	-2.35	2.34
22.5	-2.30	2.29
25.0	-2.25	2.24

Realizada esta eliminación de datos atípicos, se volvió a representar un histograma de intensidades

estandarizadas (equivalente al de la Figura 14) obteniéndose la Figura 16.

Puede apreciarse que la distribución de probabilidades se acerca mucho más a la distribución normal (coeficiente de asimetría - 0.13). Incluso, si se vuelve a representar la información de la Figura 15, se observa que ahora todos los valores caen dentro del intervalo de incerteza establecido (Figura 17).

Como ejemplo, se muestra la intensidad registrada en los pluviómetros en función el tiempo, para la carga $h = 25$ cm, generada a partir de la serie reducida (Figura 18). En esta gráfica, equivalente a la Figura 12, ya no se observa un comportamiento diferenciado de algún pluviómetro en particular (todos los valores están dentro del intervalo de incerteza de ± 3 mm/h alrededor de la media), lo cual indica que la reducción de la serie habría eliminado los errores sistemáticos introducidos por el procedimiento de medición implementado.

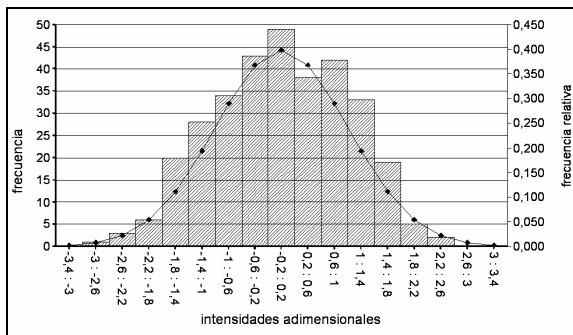


Figura 16. Histograma de intensidades adimensionales – serie reducida.

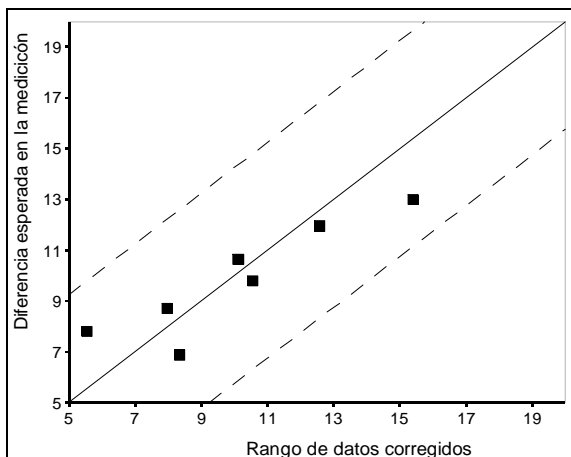


Figura 17. Errores de posicionamiento y rangos observados – serie reducida.

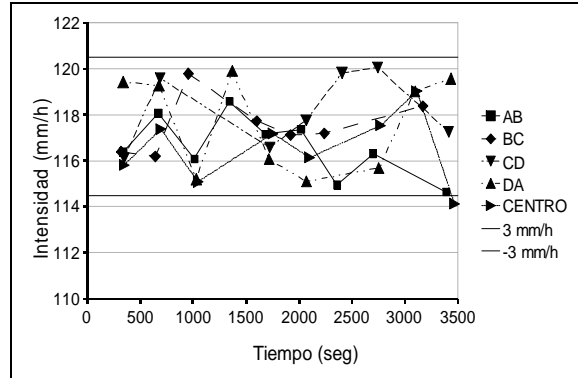


Figura 18. Intensidad en los pluviómetros – $h = 25$ cm – serie reducida.

RESULTADOS

Finalmente, con la intensidad media para cada carga estudiada y su error asociado se puede obtener una línea de tendencias sobre estos puntos que determinará la curva de calibración del simulador de lluvia.

En la Figura 19 se puede observar la curva intensidad de lluvia – altura de carga, que responde a una regresión potencial (línea continua). Como envolventes de la curva media, se observan dos curvas límites de intervalos de confianza del 99.07 % y el 90.71 % de probabilidad, lo cual surge de aplicar una distribución normal estándar a partir de la serie reducida (para la cual se asumió válida la hipótesis de normalidad). Estos valores se traducen en ± 3 mm/h y 2.11 mm/h, respectivamente. La función empírica así obtenida fue:

$$i = 15,15h^{0,63} \quad (2)$$

en donde i es la intensidad en mm/h y h es la carga sobre el formador en cm. Siendo posible medir fácilmente esta carga en el piezómetro instalado sobre la batea, la ecuación (2) en conjunto con la Figura 19 representan una herramienta muy valiosa para la estimación in situ de la intensidad de lluvia producida por el simulador sin necesidad de realizar mediciones directas de la misma.

Si se comparan las intensidades obtenidas sobre el equipo completo en funcionamiento, con aquéllas esperadas a partir del estudio de laboratorio de los formadores de gotas, se aprecia una leve disminución de las intensidades producidas, que aproximadamente mantienen una relación lineal, con

un factor de proporcionalidad de 0.86, según se aprecia en la Figura 20.

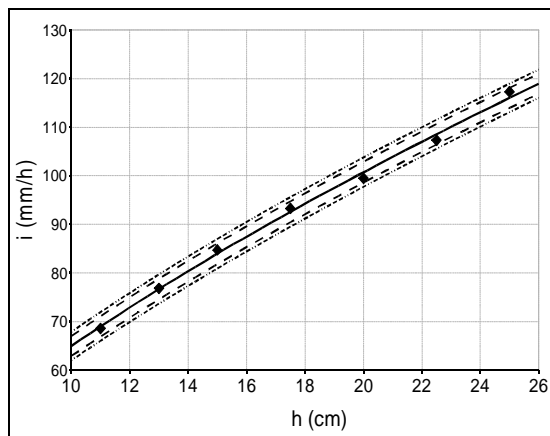


Figura 19. Relación carga – intensidad obtenida.

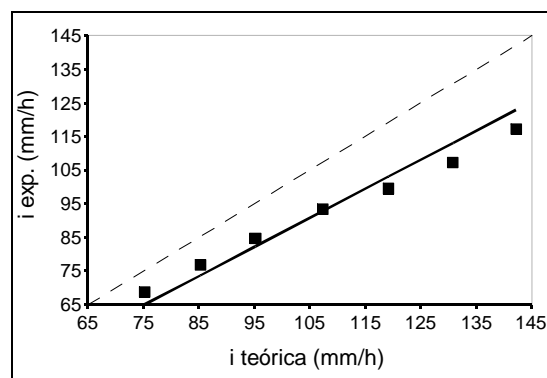


Figura 20. Intensidades reales versus teóricas.

El rango de incertidumbre así obtenido (± 3 mm/h) y el efecto de grupo anteriormente descrito podrían explicarse en base a una combinación de las siguientes causas:

- son inevitables las obstrucciones parciales o totales de las agujas que conforman los formadores, debido principalmente a la aparición de burbujas que quedan alojadas en el interior de las agujas.
- la carga h actuante no se mantiene perfectamente constante, debido a que la alimentación del tanque inferior se produce por pulsos (sistema de flotantes), dando origen a una variación periódica de la carga. Incluso, es posible interpretar el error sistemático por defecto debido a que el flotante establece una cota superior para la carga. Si bien hubiera sido posible desarrollar un sistema de alimentación continua y desborde que hubiera permitido ajustar la carga generada, la complicación operativa que esto hubiera implicado en campaña hizo desistir de esa idea,

prefiriéndose determinar a posteriori la relación empírica hallada (ecuación 2).

APLICACIÓN

El equipo fue utilizado en dos ensayos in situ, de carácter preliminar, realizados en la zona de Ciudad Universitaria, Córdoba. En estos ensayos se fijó como objetivo la medición (indirecta) de la capacidad de infiltración del suelo, a través de la cuantificación del escurrimiento superficial. El registro de los volúmenes erogados fue manual, a través de dos operadores.

Los ensayos se realizaron bajo dos intensidades extremas: 69 mm/h y 117 mm/h. La curva de escurrimiento superficial se obtuvo por superposición de las obtenidas en cada punto de descarga. A partir de éstas y por diferencia con las intensidades generadas, se obtiene la curva de infiltración y finalmente, por diferenciación de esta última, la tasa de infiltración en función del tiempo. Las curvas obtenidas corresponden a la Figura 21 ($i = 69$ mm/h) y Figura 22 ($i = 117$ mm/h).

A partir de esta información, se ajustaron los parámetros del modelo de infiltración de Horton:

$$f(t) = f_b + (f_0 - f_b)e^{-kt} \quad (3)$$

en la cual $f(t)$ es la tasa de infiltración variable en el tiempo, f_b es la tasa de infiltración base, f_0 la tasa de infiltración inicial (estas tres medidas en mm/h) y k es un factor de forma (en h^{-1}).

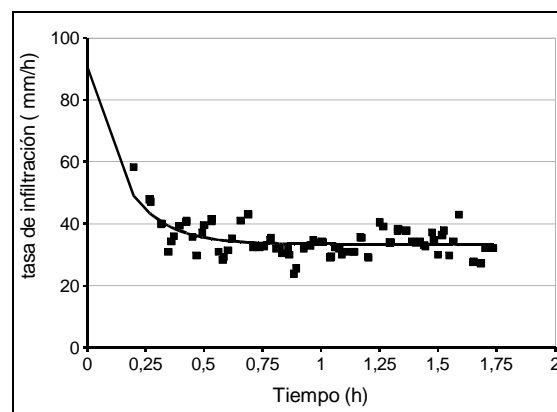


Figura 21. Tasa de infiltración – intensidad 69 mm/h.

En la Tabla 3 se muestran los valores calibrados de los parámetros del modelo de Horton (ecuación 3)

ajustados por un procedimiento de optimización no lineal. En las Figuras 21 y 22 pueden verse superpuestas a los puntos experimentales las curvas del modelo de Horton (ecuación 3) para los parámetros calibrados de la Tabla 3. Estos valores coinciden, en líneas generales, con los obtenidos previamente en la zona con el infiltrómetro de doble anillo (Weber et al., 2005).

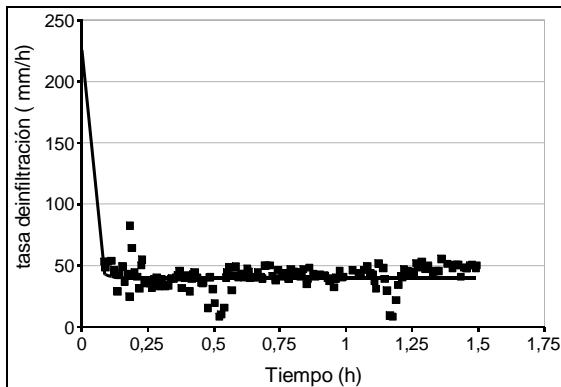


Figura 22. Tasa de infiltración – intensidad 117 mm/h.

Tabla 3. Parámetros ajustados del modelo de Horton.

parámetro	i = 69 mm/h	i = 117 mm/h
f_0 (mm/h)	90.8	225.5
f_b (mm/h)	33.3	40.1
k (1/h)	6.5	47.3

CONCLUSIONES

Se han presentado los resultados de las tareas de calibración realizadas sobre el simulador de lluvia portátil diseñado y construido en el Laboratorio de Hidráulica, Facultad Regional Córdoba, Universidad Tecnológica Nacional. Se destacan las siguientes conclusiones:

- Ha sido posible a través de un procedimiento relativamente sencillo y de bajo costo la determinación de una relación funcional entre la carga hidráulica sobre los formadores y la intensidad de lluvia producida.
- La relación así determinada tiene gran valor práctico en la actividad del experimentalista, ya que le permite definir en campo la intensidad requerida a la lluvia simulada.
- En base a un análisis estadístico ha sido posible detectar los valores anómalos (outliers) de las

series observadas, y en base a un criterio heurístico que ha mostrado su verosimilitud, corregir los valores afectados por errores sistemáticos en las mediciones realizadas.

- La normalidad de la distribución de valores así obtenidos mostraría en principio la ausencia de errores sistemáticos propios en el simulador de lluvia.
- Como valor agregado, ha sido posible estimar un intervalo de confianza de ± 3 mm/h con una probabilidad asociada del 99%, lo cual permite acotar la incidencia de la incertidumbre en la lluvia simulada sobre los resultados experimentales a obtener.
- Las pruebas preliminares realizadas en campaña han permitido por un lado, ajustar la metodología de montaje y desmontaje del equipo y por otro, generaron información experimental a la cual fue ajustada el modelo de Horton, obteniéndose valores razonables para sus parámetros.
- Futuras mejoras del equipo actualmente en marcha (adquisición electrónica de mediciones, aleatoriedad en la posición de impacto de las gotas, ampliación del rango de intensidades a generar) contribuirán a aumentar la calidad de las observaciones a realizar.

AGRADECIMIENTOS

Los autores del presente trabajo quieren manifestar su agradecimiento a la Secretaría de Ciencia y Tecnología, Universidad Tecnológica Nacional por el financiamiento recibido a través del proyecto de I+D consolidado 25E117.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Achutegui A., Abreu X., Páez M.L. 1996. Diseño y Evaluación de un Simulador de Lluvias Tipo Góter con Efecto Vibratorio. *Venezuelos*, 4:24-28.
- Aoki A.M. y Sereno R. 1999. Modificaciones de un Microsimulador de Lluvia. *Investigación Agrícola*, vol 19 N° 1 y 2, 47-51.
- Benito E.; de Blas, E.; Santiago, J.L. y Varela, M.E. 2001. Descripción y Puesta a Punto de un Simulador de Lluvia de Campo para Estudios de Escorrentía Superficial y Erosión del Suelo. *Cuadernos Laboratorio Xeolóxico de Laxe* n° 26.
- Irurtia C.B., Mon R. 1994. Microsimulador de Lluvia para Determinar Infiltración a Campo. *Publicación N° 176*. Instituto de Suelos, Castelar, Bue-

- nos Aires, República Argentina. Pp. 18.
- Kamphorst, A. 1987. A Small Rainfall Simulator for the Determination of Soil Erodibility. Netherlands Journal of Agricultural Science, 35, 407 - 415.
- Marelli H. J. 1989. La Erosión Hídrica. Proyecto: Alternativas Mejoradas Conservacionistas de Producción Agrícola Ganadera en el Sur de Córdoba. Publicación técnica N°1. INTA, Estación Experimental Agropecuaria Marco Juárez, Córdoba, Argentina.
- Paoli, H. I., Rojas, J. A. 2006. Estudio Hidráulico, Teórico y Experimental, sobre Formadores de Gotas. JEI 2006, Mendoza.
- Paoli, H. I. 2009. Diseño, construcción y puesta a punto de un simulador de lluvia portátil para la determinación in situ de parámetros hidrológicos. Trabajo final de Ingeniería Civil – U.T.N. – F.R.C.
- Pla Sentis, I. 1981. Simuladores de Lluvia Para el Estudio de Relaciones Suelo Agua Bajo Agricultura de Secano en los Trópicos. Rev. Fac. Agron. 12 (1-2): 81-93. Maracay, Venezuela.
- Rostagno, C.M., Garayzar, D. 1995. Diseño de un Simulador de Lluvia para Estudios de Infiltración y Erosión de Suelos. Ciencia del Suelo, 13, 41 - 43.
- Weber J., Urbano J., Stuyck E., Azelart D., Martinez N. 2005. Caracterización de los Parámetros del Modelo de Infiltración de Horton en Suelos de la Ciudad de Córdoba. Cuadernos del Curiham, vol 11 N° 1, 29-38.
- Weber, J. F., Paoli, H., Apestegui, L. 2009. Diseño, construcción y puesta a punto de un microsimulador de lluvia portátil para estudios hidrológicos. XXII Congreso Nacional del Agua - CONAGUA 2009 – Trelew.

Artículo recibido el 03/2010 y aprobado para su publicación el 06/2010.